

## KARAKTERISTIK TEPUNG BERAS HASIL PERLAKUAN KOMBINASI GELOMBANG MIKRO, ULTRASONIKASI DAN PEMANASAN LEMBAB

*[Characteristics of Modified Rice Flour by Combination of Microwave, Ultrasonication with Heat Moisture Treatments]*

Shinta Dewi Ardhiyanti<sup>1,3)</sup>, Adil Basuki Ahza<sup>2)\*</sup>, Didah Nur Faridah<sup>2)</sup>, dan Bram Kusbiantoro<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Ilmu Pangan, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor

<sup>2)</sup> Departemen Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor

<sup>3)</sup> Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi), Subang

Diterima 16 Oktober 2016 / Disetujui 15 Desember 2016

### ABSTRACT

*Broken and brewer rice as by product of rice milling can be developed into a functional product with higher economic value, i.e. higher resistant starch (RS) rice flour. This research was aimed to study the modification of broken and brewer rice flour by the combination of microwave and ultrasonication with heat moisture treatment (HMT) to enhance RS contents and its associated microstructural and pasting characteristics changes. The results showed that five modified rice flours that had the highest RS contents were ultrasonicated with 20% of moisture content-HMT 10 and 12 hours rice flours, microwaved with 20% of moisture content-HMT 10 hours rice flour, microwaved with 50% of moisture content-HMT 8 and 10 hours rice flours. Their RS content ranged from 6.50–9.25% which were higher than the RS content of native rice flour (1.89%). Those five modified flours showed noticeable structural changes from the disappearance of non starch particulates, becoming more porous and larger size matrices. The pasting temperature of those modified flour increased (0.11–9.16% from native flour's pasting temperature) and their peak viscosity decreased (47.15–71.15% from native flour's peak viscosity). The modified flour had improved heat stability with the decrease in breakdown (88.07–100.00% from native flour's breakdown value) and less retrogradation tendency during cooling (44.38–66.62% from native flour's setback value). The combined treatment caused reduction of crystallinity ratio from 0.94 (native) to 0.91-0.86 (modified flour).*

**Keywords:** flour, HMT, microwave, rice, ultrasonication

### ABSTRAK

Beras patah dan menir sebagai produk samping penggilingan padi dapat dikembangkan menjadi produk fungsional dengan nilai ekonomi yang lebih tinggi seperti tepung beras tinggi pati resisten (RS). Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari peningkatan kadar RS dan karakteristik tepung beras patah dan menir yang dimodifikasi dengan kombinasi gelombang mikro-heat moisture treatment (HMT) dan ultrasonikasi-HMT. Lima tepung termodifikasi, yakni tepung beras dengan perlakuan ultrasonikasi kadar air 20%-HMT 10 dan 12 jam, gelombang mikro kadar air 20%-HMT 10 jam, serta gelombang mikro kadar air 50%-HMT 8 dan 10 jam memiliki kadar RS berkisar antara 6,50–9,25% yang lebih tinggi dari kadar RS tepung beras asli (1,89%). Kelima tepung beras termodifikasi tersebut menunjukkan perubahan struktur mikro dengan hilang/berkurangnya partikulat non pati, permukaan yang lebih berpori serta ukuran agregat yang lebih besar. Suhu awal terbentuknya pasta dari kelima tepung termodifikasi tersebut meningkat (0,11–9,16% dari tepung beras asli), namun viskositas puncaknya menurun (47,15–71,15% dari tepung beras asli). Tepung termodifikasi memiliki kestabilan yang lebih baik selama pemanasan (nilai breakdown 88,07–100,00% lebih rendah dari tepung beras asli) serta kecenderungan teretrogradasi yang lebih rendah (nilai setback 44,38–66,62% lebih rendah dari tepung beras asli). Perlakuan kombinasi menyebabkan penurunan rasio kristalinitas dari 0,94 (tepung beras asli) menjadi 0,91-0,86 (tepung beras termodifikasi).

**Kata kunci:** beras, gelombang, mikro, HMT, ultrasonikasi

\*Penulis Korespondensi:  
Email: [adil@ipb.ac.id](mailto:adil@ipb.ac.id)

## PENDAHULUAN

Mutu fisik beras sangat ditentukan oleh persentase beras kepala. Semakin besar persentase beras kepala semakin tinggi kelas mutu beras (BSN, 2015). Upaya untuk meningkatkan kualitas beras dapat dilakukan dengan memisahkan beras kepala dari beras patah dan menir. Sebagai produk samping penggilingan, beras patah dan menir mempunyai nilai ekonomi yang rendah. Tantangan bagi pelaku usaha penggilingan beras adalah memanfaatkan produk samping tersebut. Salah satu upaya peningkatan nilai tambah beras patah dan menir adalah dengan memprosesnya menjadi tepung yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku produk pangan berbasis beras dengan manfaat fungsional yang lebih besar.

Konsumsi pati yang mudah dicerna secara berlebihan pada kelompok usia dewasa dapat menjadi salah satu faktor risiko penyakit tidak menular/kronis (Birt *et al.*, 2013). Mengonsumsi pangan dengan kadar pati resisten yang lebih tinggi, dapat mengurangi risiko obesitas serta munculnya penyakit seperti diabetes melitus. Pati resisten memiliki struktur yang lebih kompak sehingga tidak dapat dihidrolisis oleh enzim pencernaan (Belitz *et al.*, 2009; Birt *et al.*, 2015). Selain dapat membatasi *intake energy*, pati resisten telah dibuktikan memiliki beberapa manfaat kesehatan bagi tubuh seperti mengurangi risiko kanker usus besar, membantu meregulasi metabolisme makronutrien, memperbaiki sekresi hormon (Birt *et al.*, 2015), mengurangi level patogen dalam usus, mengurangi toksisitas cairan feses, meningkatkan sistem imun, meningkatkan pembentukan koloni *Lactobacillus* dan *Bifidobacteria* serta meningkatkan absorpsi Ca dan Mg (Brouns *et al.*, 2002).

Pati resisten dapat dihasilkan dari proses modifikasi, baik secara kimia, enzimatis, maupun fisik. Akhir-akhir ini modifikasi pati secara fisik banyak mendapat perhatian, karena prosesnya yang tidak melibatkan bahan kimia serta lebih sederhana dibandingkan proses modifikasi enzimatis (Kaur *et al.*, 2012). *Osmotic-pressure treatment* (OPT) (Pukk-ahuta *et al.*, 2007) dan teknologi hidrotermal seperti *heat moisture treatment* (HMT) dan *annealing* (Cham dan Suwannaporn, 2010; Kiatponglerpa *et al.*, 2015) merupakan contoh teknologi modifikasi pati secara fisik yang telah dilaporkan dapat meningkatkan kandungan pati resisten pada beberapa bahan makanan. Ultrasonikasi memberikan efek kavitasi yang mampu memecah rantai polimer pati sehingga berpotensi mempercepat pembentukan pati resisten (Bizkup *et al.*, 2005). Jiang *et al.* (2011) melaporkan bahwa pemasakan menggunakan gelombang mikro menurunkan kecepatan hidrolisis pati jika dibandingkan dengan perebusan biasa.

Berdasarkan hasil-hasil penelitian tersebut, kombinasi teknologi ultrasonikasi dan gelombang mikro dengan teknologi hidrotermal berpotensi menjadi teknologi alternatif yang mampu meningkatkan kadar pati resisten pada tepung beras. Penelitian ini dilaksanakan untuk mempelajari kemampuan perlakuan kombinasi teknologi ultrasonikasi dan gelombang mikro dengan teknologi hidrotermal dalam meningkatkan kadar pati resisten tepung beras, dan pengaruh perlakuan kombinasi yang berhasil meningkatkan kadar pati resisten secara signifikan terhadap struktur mikro, rasio kristalinitas dan sifat pasta tepung beras.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan

Beras patah dan menir varietas Ciherang merupakan hasil samping unit penggilingan padi Koperasi Karyawan BB Padi pada bulan September 2015. Sebelum digunakan, beras disimpan secara vakum dalam kemasan plastik multilayer pada suhu 4°C.

### Preparasi sampel

Beras ditepungkan sesaat sebelum diberikan perlakuan menggunakan mesin penepung kering (Cyclotec, Tecator, Denmark), kemudian disaring untuk mendapatkan tepung 100 mesh. Parameter proses pemanasan gelombang mikro dengan piringan contoh berputar (LG MS2342D, output power 450W, Korea), ultrasonikasi (Elmasonic S 180 H, output power 200 W, Jerman) serta *heat moisture treatment* (HMT) dipilih berdasarkan data pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Ahza *et al.*, 2016). Pengkodean tepung berdasarkan perlakuan yang diberikan pada tepung beras asli. Kode U untuk perlakuan ultrasonikasi, M untuk perlakuan gelombang mikro, dan H untuk perlakuan HMT. Angka setelah U dan M menunjukkan kadar air perlakuan ultrasonikasi dan gelombang mikro, sedangkan angka setelah H menunjukkan durasi perlakuan HMT. Pengkodean tepung selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 1.

### Kombinasi ultrasonikasi-HMT

Air deion ditambahkan ke dalam tepung dan dihomogenisasi (pengaduk elektrik, Miyako, Indonesia), hingga kadar airnya  $\pm 20$  dan 50% bobot kering (bk). Kemudian tepung dikemas dan dikelim dalam *laminated aluminium foil bag* dan disimpan di dalam pendingin (4°C, 6 jam). Tepung diultrasonikasi dalam botol gelas bertutup, selama 15 menit pada suhu 2°C, kemudian disimpan pada pendingin (4°C, 16 jam). Setelah disimpan, tepung disesuaikan kadar airnya ( $\pm 30\%$  bk), kemudian diberi perlakuan HMT dalam oven (Memmert,

Jerman) bersuhu 90°C selama 6, 8, 10 dan 12 jam. Setelah HMT selesai, tepung dikeringkan pada suhu oven 40°C, 6 jam (Binder, Jerman).

Tabel 1. Pengkodean tepung berdasarkan perlakuan

Kode	Perlakuan	Kode	Perlakuan
U20H6	Ultrasonikasi kadar air 20% HMT 6 jam	M20H6	Gelombang mikro kadar air 20% HMT 6 jam
U20H8	Ultrasonikasi kadar air 20% HMT 8 jam	M20H8	Gelombang mikro kadar air 20% HMT 8 jam
U20H10	Ultrasonikasi kadar air 20% HMT 10 jam	M20H10	Gelombang mikro kadar air 20% HMT 10 jam
U20H12	Ultrasonikasi kadar air 20% HMT 12 jam	M20H12	Gelombang mikro kadar air 20% HMT 12 jam
U50H6	Ultrasonikasi kadar air 50% HMT 6 jam	M50H6	Gelombang mikro kadar air 50% HMT 6 jam
U50H8	Ultrasonikasi kadar air 50% HMT 8 jam	M50H8	Gelombang mikro kadar air 50% HMT 8 jam
U50H10	Ultrasonikasi kadar air 50% HMT 10 jam	M50H10	Gelombang mikro kadar air 50% HMT 10 jam
U50H12	Ultrasonikasi kadar air 50% HMT 12 jam	M50H12	Gelombang mikro kadar air 50% HMT 12 jam

### Kombinasi gelombang mikro-HMT

Tepung yang telah disesuaikan kadar airnya sesuai metode pada perlakuan ultrasonikasi HMT diproses dalam gelombang mikro selama 1 menit (kadar air  $\pm 20\%$  bk) dan 2 menit (kadar air  $\pm 50\%$  bk). Setelah pemanasan gelombang mikro, sampel disimpan pada pendingin (4°C, 16 jam). Setelah disimpan, tepung disesuaikan kadar airnya ( $\pm 30\%$  bk), kemudian disimpan pada pendingin (4°C, 6 jam). Tepung diberi perlakuan HMT dalam oven (Memmert, Jerman) bersuhu 90°C selama 6, 8, 10 dan 12 jam. Setelah HMT selesai, tepung dikeringkan pada suhu oven 40°C, 6 jam (Binder, Jerman).

### Analisis kadar pati resisten (AOAC, 2005)

Sebanyak 100 $\pm$ 5 mg sampel ditimbang di dalam tabung sentrifuse 50 mL. Kemudian ditambah 4 mL larutan pancreatic  $\alpha$ -amylase (Megazyme, Irlandia) dan amiloglukosidase (AMG, Megazyme). Larutan berisi sampel dan enzim diinkubasi selama 16 jam pada suhu 37°C di dalam *waterbath* bergoyang. Setelah 16 jam tabung dikeluarkan dari *waterbath*, segera ditambahkan 4 mL ethanol dan divortek. Tabung disentrifuse (Hettich, Jerman) pada kecepatan 3000 rpm selama 20 menit. Supernatan yang diperoleh dipisahkan dari endapan. Ethanol 50% sebanyak 2 mL ditambahkan ke dalam tabung sentrifuse berisi endapan. Kemudian tabung divortex

dan disentrifuse dengan kecepatan dan durasi yang sama. Tahap ini dilakukan sebanyak 2 kali.

Selanjutnya endapan yang tersisa dilarutkan dengan penambahan 2 mL KOH 2 M (Merck, USA) dan diaduk pada *ice waterbath* menggunakan *magnetic stirrer* selama 20 menit untuk melarutkan bagian pati resisten. Setelahnya sampel diangkat dari *ice waterbath* dan ditambahkan bufer sodium asetat 1,2 M (pH 3,8) sebanyak 8 mL serta 0,1 mL AMG. Larutan diinkubasi pada suhu 50°C selama 30 menit dengan pengadukan berselang. Setelah diinkubasi selama 30 menit, tabung berisi sampel disentrifuse pada kecepatan 3000 rpm selama 10 menit. Sebanyak 0,1 mL supernatant dipindahkan ke dalam tabung reaksi. Kemudian ditambahkan 3 mL larutan GOPOD dan diinkubasi pada suhu 50°C selama 20 menit. Absorbansi larutan diukur bersama blanko menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 510 nm (Shimadzu 1800, Jepang). Blanko dipersiapkan dengan mencampur 0,1 mL buffer sodium asetat 100 mM (pH 4,5) dan 3 mL larutan GOPOD. Standar disiapkan menggunakan 0,1 mL glukosa standar dengan konsentrasi 1 mg/mL (Megazyme) ditambah 3 mL larutan GOPOD. Selanjutnya standar diinkubasi pada suhu 50°C selama 20 menit. Standar diukur sebanyak 4 ulangan.

### Pengamatan mikro struktur tepung

Pengamatan struktur granula pati dilakukan dengan SEM JSM-6510A/JSM-6510LA (JEOL, Jepang). Pengamatan dilakukan dengan perbesaran 1000 kali dan 6000 kali. Butiran dilapisi dengan lapisan tipis emas menggunakan *auto fine coater* (10 mA, 80 detik). Pemindaian struktur mikro tepung dilakukan dengan menggunakan SEM pada tegangan 15 kV.

### Analisis sifat pasta

Analisis karakter pasta tepung beras dilakukan menggunakan Rapid Visco Analyser (RVA, Perten Tecmaster, Swedia). Ditimbang sebanyak  $\pm 2,5$  g tepung (bk) dalam wadah contoh RVA, kemudian ditambahkan  $\pm 25$  g aquades sehingga mencapai konsentrasi tepung 10%. Setelah dihomogenisasi dengan pengadukan manual, sampel dipanaskan hingga 50°C dalam waktu 1 menit, kemudian dipanaskan hingga 95°C selama 4 menit, suhu dijaga tetap pada 95°C selama 1,5 menit. Pasta didinginkan hingga 50°C dalam waktu 4 menit, dan terakhir didiamkan pada suhu 50°C selama 2 menit. Selama proses pemanasan kecepatan pengadukan diatur pada 160 rpm. Parameter perubahan sifat pasta yang dianalisis antara lain: suhu terbentuknya pasta, viskositas puncak, *breakdown*, viskositas akhir dan *setback* (Klein *et al.*, 2013).

### Analisis FTIR

Analisis FTIR sampel tepung beras menggunakan spektrofotometer FTIR (Tensor 37, Bruker, Jerman). Pengamatan absorbansi dilakukan pada kisaran panjang gelombang 399–3996  $\text{cm}^{-1}$ . Rasio absorbansi pada panjang gelombang 1047 dan 1022  $\text{cm}^{-1}$  diperhitungkan untuk menentukan rasio antara struktur kristalin dan struktur amorf (Zeng F *et al.*, 2015; Chung *et al.*, 2009). Rasio absorbansi pada panjang gelombang 1022 dan 955  $\text{cm}^{-1}$  diperhitungkan untuk menentukan perubahan area amorf, semakin tinggi rasio menunjukkan semakin besarnya area amorf (Htoon *et al.*, 2009).

### Rancangan percobaan dan analisis statistik

Desain percobaan yang digunakan adalah rancangan acak lengkap dengan 2 kali ulangan untuk pengukuran kadar RS sebagai respon yang diamati. Data yang diperoleh diuji beda nyata menggunakan program statistik STAR 2013 (IRRI) dengan bantuan Microsoft Excel. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan ( $P < 0,05$ ) maka dilakukan uji lanjut dengan *Duncan's Multiple Range Tests* (DMRT) pada taraf kepercayaan 95%. Lima tepung beras termodifikasi yang memiliki kadar RS tertinggi dianalisa struktur mikro (SEM), rasio kristalinitas (FTIR) dan sifat pastanya (RVA). Analisis FTIR dan sifat pasta dilakukan 2 kali ulangan. Data yang diperoleh diuji beda nyata menggunakan program statistik STAR 2013 (IRRI) dengan bantuan Microsoft Excel. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan ( $P < 0,05$ ) maka dilakukan uji lanjut dengan *Duncan's Multiple Range Tests* (DMRT) pada taraf kepercayaan 95%.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kadar pati resisten tepung beras asli dan termodifikasi

Hampir seluruh sampel dengan perlakuan kombinasi mempunyai kadar RS yang lebih tinggi dibandingkan tepung beras asli ( $P < 0,05$ ). Tepung dengan perlakuan ultrasonikasi kadar air 20%-HMT 6 hingga 12 jam mempunyai kadar RS 2,29–6,89%, tepung dengan perlakuan ultrasonikasi kadar air 50%-HMT 6 hingga 12 jam mempunyai kadar RS 2,56–4,02%. Tepung dengan perlakuan gelombang mikro kadar air 20%-HMT 6 hingga 12 jam mempunyai kadar RS 1,87–8,04%, tepung dengan perlakuan ultrasonikasi kadar air 50%-HMT 6 hingga 12 jam mempunyai kadar RS 2,22–9,25%. Data kadar RS tepung beras asli dan termodifikasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Peningkatan kadar RS tepung beras termodifikasi berkisar antara 17,24–389,51% dibandingkan kadar RS tepung beras asli yang besarnya 1,89% (Tabel 2). Persentase peningkatan maksimum kadar

RS pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan hasil penelitian Hung *et al.* (2016) pada beras beramilosa sedang dengan perlakuan HMT tunggal (kadar air 30%, 110°C, 8 jam). Persentase peningkatan kadar RS maksimum pada penelitian tersebut sebesar 267,7% dibandingkan pati beras asli. Suhu HMT yang lebih tinggi pada penelitian Hung *et al.* (2016) menyebabkan lebih rendahnya peningkatan kadar RS pada penelitian tersebut. Suhu, kadar air dan durasi HMT mempengaruhi daya cerna pati termodifikasi (Hoover, 2010). Kadar air yang terbatas pada tahapan HMT menyebabkan perubahan struktur pati. Air dalam granula membuat sebagian molekul pati berotasi, sehingga membentuk ikatan hidrogen lebih banyak. Konformasi tersebut menghasilkan pati termodifikasi dengan struktur *double helix* yang lebih teratur dan resisten terhadap amilolisis (Zhou *et al.*, 2014).

Tabel 2. Kadar RS tepung dengan perlakuan kombinasi ultrasonikasi-HMT dan gelombang mikro HMT

Tepung	RS $\pm$ SD (% bk)	Tepung	RS $\pm$ SD (% bk)
<i>Native</i>	1,89 $\pm$ 0,01 <sup>i</sup>	M20H6	1,87 $\pm$ 0,05 <sup>i</sup>
U20H6	2,30 $\pm$ 0,10 <sup>hi</sup>	M20H8	2,48 $\pm$ 0,01 <sup>9h</sup>
U20H8	2,29 $\pm$ 0,02 <sup>hi</sup>	M20H10	8,04 $\pm$ 0,29 <sup>b</sup>
U20H10	6,89 $\pm$ 0,11 <sup>od</sup>	M20H12	4,92 $\pm$ 0,38 <sup>e</sup>
U20H12	6,50 $\pm$ 0,26 <sup>d</sup>	M50H6	5,08 $\pm$ 0,16 <sup>e</sup>
U50H6	2,77 $\pm$ 0,12 <sup>g</sup>	M50H8	7,22 $\pm$ 0,02 <sup>c</sup>
U50H8	2,56 $\pm$ 0,47 <sup>gh</sup>	M50H10	9,25 $\pm$ 0,18 <sup>a</sup>
U50H10	4,02 $\pm$ 0,03 <sup>f</sup>	M50H12	2,22 $\pm$ 0,01 <sup>hi</sup>
U50H12	3,84 $\pm$ 0,35 <sup>f</sup>		

Keterangan: \*data dengan *superscript* berlainan maka berbeda secara signifikan ( $P < 0,05$ )

Perlakuan kombinasi gelombang mikro dan HMT 90°C selama 10 jam pada penelitian ini lebih efektif meningkatkan kadar RS dibandingkan kombinasi perlakuan lainnya. Namun nilai tersebut masih lebih rendah dibandingkan kadar RS tepung beras termodifikasi HMT tunggal selama 12 jam pada suhu dan kadar yang sama, yakni sebesar 10,29% (Ahza *et al.*, 2016). Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian Ahza *et al.* (2016). Pada penelitian Ahza *et al.* (2016) peningkatan durasi HMT hingga 12 jam meningkatkan kadar RS tepung beras. Pada penelitian ini peningkatan durasi HMT hingga 12 jam menyebabkan penurunan kadar RS. Hal ini disebabkan adanya perlakuan kombinasi yang mendahului HMT, khususnya gelombang mikro. Pada proses pemanasan gelombang mikro khususnya pada kadar air 50%, tepung terlebih dahulu tergelatinisasi dan mengalami pemecahan granula pati, sehingga tepung pada perlakuan tersebut lebih terpapar oleh perlakuan HMT. Pemanasan HMT yang lebih lama (12 jam) yang didahului perlakuan gelombang mikro dapat berpengaruh

negatif terhadap pembentukan RS dengan memperkecil berat molekul (Pratiwi, 2016), padahal untuk membentuk RS diperlukan pati dengan derajat polimerisasi 10–35 yang merupakan ukuran pati yang paling banyak menyusun RS (Schmiedl *et al.*, 2000).

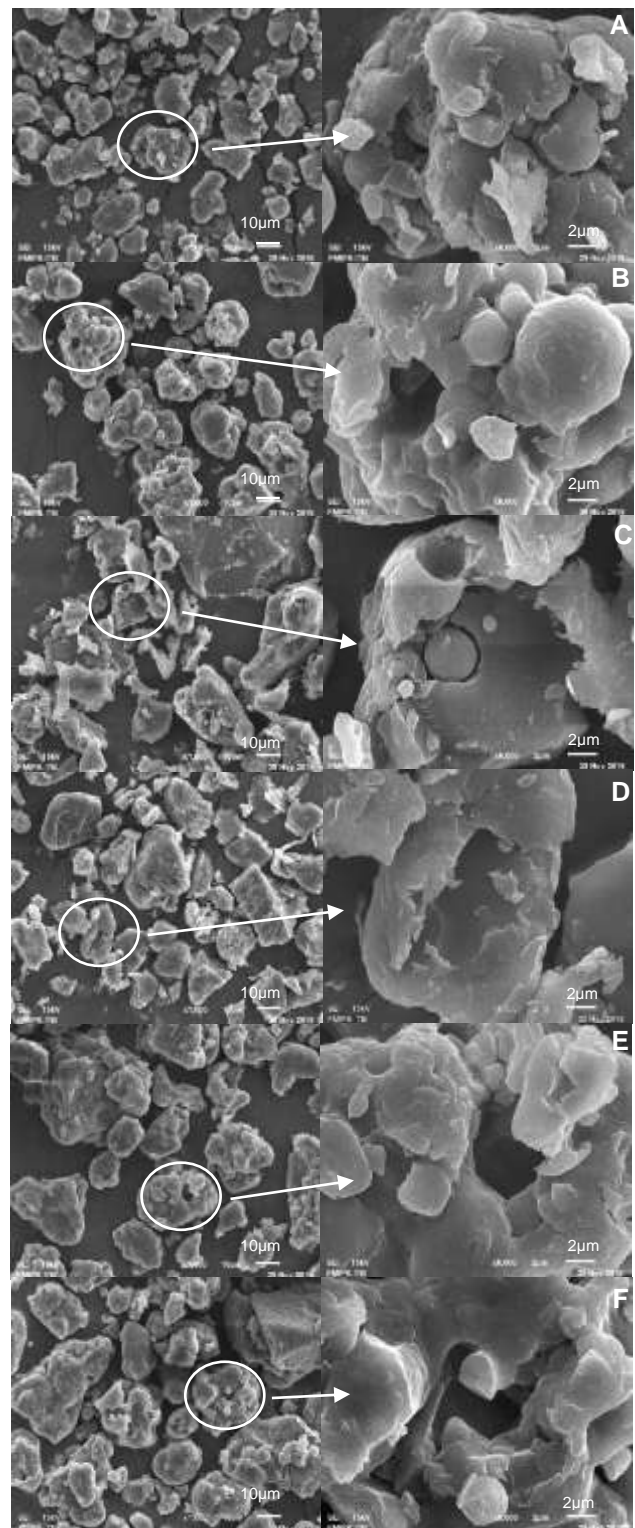
### Struktur mikro granula tepung beras asli dan termodifikasi

Citra SEM granula tepung beras asli dan tepung beras termodifikasi berupa agregat matriks pati, protein dan komponen lain (Gambar 1) yang tidak hilang selama proses penepungan kering (Leewatchararongjaroen dan Anuntagool, 2016; de Souza *et al.*, 2016). Agregat tepung beras asli menggumpal tak beraturan dengan kisaran ukuran 1–20  $\mu\text{m}$ . Citra tersebut berbeda dengan bentuk polygonal/polyhedral granula pati beras asli yang memiliki kisaran ukuran 2–7  $\mu\text{m}$  (Jiranuntakul *et al.*, 2011). Agregat tepung beras termodifikasi cenderung lebih besar dibandingkan agregat tepung beras asli. Diameter agregat tepung hasil perlakuan ultrasonikasi-HMT (kadar air 20% selama 10 jam) mencapai 45  $\mu\text{m}$ . Pembesaran granula pati beras ketan dan non ketan juga dilaporkan oleh Anderson dan Guraya (2006) setelah diberi perlakuan HMT gelombang mikro pada kadar air 20% dengan suhu mendekati titik leleh, selama 60 menit. Agregasi akibat perlakuan HMT gelombang mikro tersebut (Anderson dan Guraya, 2006) dapat menjelaskan citra agregat yang lebih besar pada tepung termodifikasi.

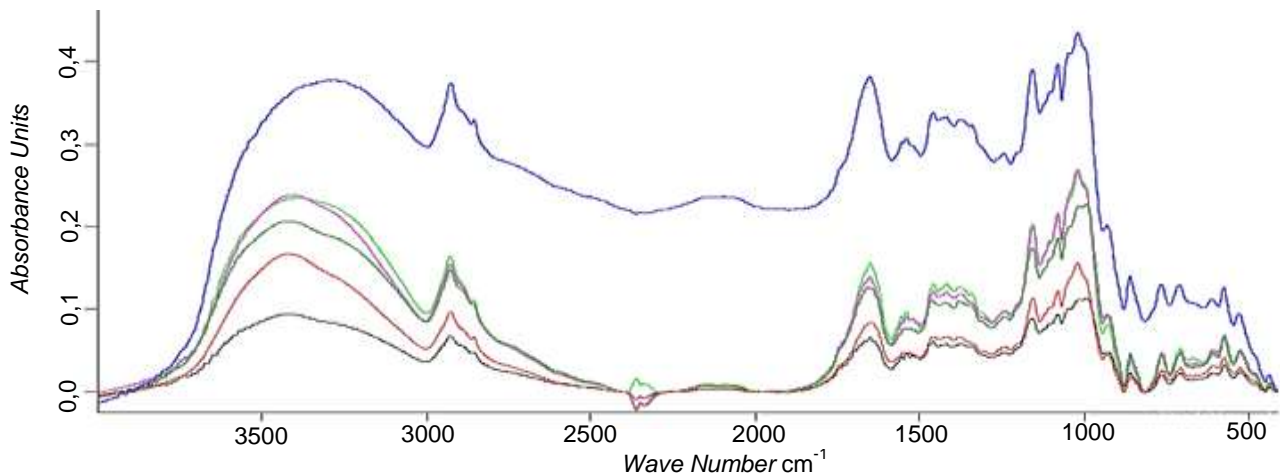
Permukaan agregat tepung beras termodifikasi cenderung lebih *porous* dibandingkan tepung beras asli. Permukaan agregat tepung tepung beras asli nampak memiliki lebih banyak partikel non pati yang menempel dibandingkan permukaan agregat tepung termodifikasi (Gambar 1). Pada Gambar 1 terlihat adanya retakan dan lekukan akibat ultrasonikasi, sejalan dengan temuan Sujka dan Jamroz (2013). Namun perubahan struktur permukaan agregat tepung dengan perlakuan gelombang mikro-HMT pada kadar air 50% tampak lebih nyata dengan adanya agregat yang terpecah dan permukaan yang lebih *porous*. Perlakuan ultrasonikasi pada suhu rendah dapat menyebabkan perubahan permukaan agregat tidak tampak begitu nyata (Pinto *et al.*, 2015).

### Rasio kristalinitas tepung beras asli dan termodifikasi

Spektra FTIR pada Gambar 2 menunjukkan pola yang sama antara tepung beras asli dan tepung dengan perlakuan kombinasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses modifikasi yang diberikan kepada tepung beras tidak menyebabkan perubahan gugus fungsi/struktur kimia (Zeng S *et al.*, 2015).



Gambar 1. Pengaruh kombinasi gelombang mikro-HMT pada kadar air 20% HMT 10 jam (B) kadar air 50% HMT 8 jam (C) kadar air 50% HMT 10 jam (D) dan ultrasonikasi-HMT pada kadar air 20% HMT 10 jam (E) kadar air 20% HMT 12 jam (F), terhadap tepung beras asli (A)



Gambar 2. Spektra FTIR tepung beras asli dan termodifikasi. Tepung beras asli (biru); tepung dengan perlakuan gelombang mikro kadar air 20%-HMT 10 jam (hijau tua); tepung dengan perlakuan gelombang mikro kadar air 50%-HMT 8 jam (merah); tepung dengan perlakuan ultrasonikasi kadar air 20%-HMT 10 jam (hijau muda) 12 jam (hitam)

Meskipun memiliki pola yang sama, seluruh tepung dengan perlakuan kombinasi memiliki intensitas absorbansi yang lebih rendah dibandingkan tepung beras asli. Penurunan intensitas tersebut menunjukkan adanya perubahan konformasi tertentu pada tepung beras termodifikasi (Zeng S *et al.*, 2015). Absorbansi FTIR pada panjang gelombang  $1047\text{ cm}^{-1}$  meningkat dengan adanya peningkatan area kristalin, absorbansi pada panjang gelombang  $1022\text{ cm}^{-1}$  meningkat dengan adanya pertambahan area amorf pati (Chung *et al.*, 2009; Zeng F *et al.*, 2015). Seperti halnya absorbansi pada panjang gelombang  $1047\text{ cm}^{-1}$ , absorbansi pada panjang gelombang  $995\text{ cm}^{-1}$  juga meningkat dengan adanya peningkatan area kristalin (Ambigaipalan *et al.*, 2014). Oleh karena itu rasio antara absorbansi pada panjang gelombang  $1047\text{ cm}^{-1}$  dan  $1022\text{ cm}^{-1}$  digunakan untuk menunjukkan jumlah relatif area kristalin terhadap area amorf (Zeng F *et al.*, 2015; Warren *et al.*, 2016), sedangkan rasio antara absorbansi pada panjang gelombang  $1022\text{ cm}^{-1}$  dan  $995\text{ cm}^{-1}$  digunakan untuk menunjukkan jumlah relatif area amorf terhadap area kristalin. Jumlah relatif area kristalin terhadap area amorf tepung beras asli dan tepung beras termodifikasi adalah 0,86–0,94 (Tabel 3). Seluruh tepung dengan perlakuan kombinasi memiliki jumlah relatif area kristalin terhadap area amorf yang lebih rendah dibandingkan tepung asli ( $P<0,05$ ). Jumlah relatif area amorf terhadap area kristalin tepung beras asli dan tepung beras termodifikasi adalah 0,98–1,16 (Tabel 3). Berkebalikan dengan jumlah relatif area kristalin terhadap area amorf, hampir seluruh tepung termodifikasi memiliki jumlah relatif area amorf terhadap area kristalin lebih tinggi dibandingkan tepung asli ( $P<0,05$ ).

Penurunan rasio absorbansi  $1047/1022\text{ cm}^{-1}$  dan peningkatan rasio absorbansi  $1022/995\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan bahwa terjadi perubahan konformasi pati yakni menurunnya daerah kristalin pada tepung beras termodifikasi (Zeng F *et al.*, 2015, Chung *et al.*, 2009). Berkurangnya daerah kristalin pada tepung dengan perlakuan ultrasonikasi-HMT dapat disebabkan oleh adanya air yang berdifusi ke dalam granula pati dan mengganggu konformasi pati (Jambrak *et al.*, 2010) pada saat proses ultrasonikasi. Pada tepung beras dengan perlakuan gelombang mikro-HMT berkurangnya daerah kristalin dapat disebabkan oleh pemanasan pada saat perlakuan gelombang mikro, yang difasilitasi air pada perlakuan dengan kadar air tinggi, sehingga memungkinkan terjadinya pengembangan granula dan terganggunya konformasi kristalin tepung. Selain itu perlakuan HMT tunggal juga berpengaruh pada penurunan jumlah area kristalin pati beras (Zhou *et al.*, 2014).

Tabel 3. Hasil analisis FTIR tepung *native* dan tepung termodifikasi

Sampel	Rasio absorbansi pada $1047$ dan $1022\text{ cm}^{-1}$	Rasio absorbansi pada $1022$ dan $995\text{ cm}^{-1}$
Asli	$0,94\pm0,00^a$	$1,05\pm0,00^c$
M20H10	$0,89\pm0,01^c$	$0,99\pm0,01^d$
M50H8	$0,88\pm0,00^c$	$1,10\pm0,00^b$
M50H10	$0,86\pm0,01^d$	$1,16\pm0,02^a$
U20H10	$0,88\pm0,00^c$	$1,06\pm0,00^c$
U20H12	$0,91\pm0,00^b$	$0,98\pm0,00^d$

Keterangan: \*data dalam satu kolom dengan *superscript* berlainan maka berbeda secara signifikan ( $P<0,05$ )



### Sifat pasta tepung beras asli dan termodifikasi

Gambar 3 menunjukkan profil pasta tepung termodifikasi yang lebih rendah dibandingkan tepung beras. Kombinasi ultrasonik-HMT maupun gelombang mikro-HMT meningkatkan suhu awal gelatinisasi ( $P < 0,05$ ) (Tabel 4).

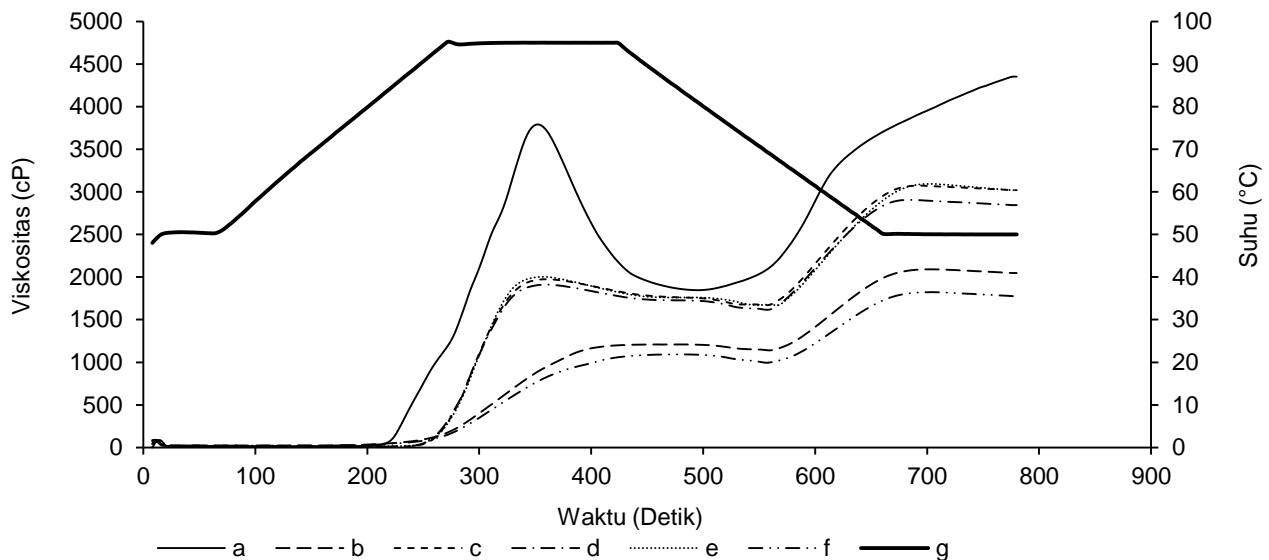
Temuan ini sesuai dengan hasil proses HMT yang dilaporkan oleh Zavareze *et al.* (2010). Peningkatan suhu awal terbentuknya pasta dan peningkatan suhu gelatinisasi kemungkinan besar disebabkan oleh proses retrogradasi dan pembentukan kristal baru yang memiliki stabilitas termal yang lebih tinggi (Klein *et al.*, 2013). Kombinasi gelombang mikro-HMT dengan kadar air 50%, selama 8 dan 10 jam, menurunkan kekentalan pasta puncak hingga 1209,50 dan 1094,00 cP ( $P < 0,05$ ). Penurunan tersebut lebih drastis dibandingkan dengan kombinasi HMT pada kadar air 20%, baik dengan ultrasonikasi (1914,00 dan 2003,50 cP) maupun gelombang mikro (1977,00 cP) (Tabel 4). Penurunan nilai puncak viskositas diduga akibat tingginya kerusakan dan retrogradasi pati sesuai temuan (BeMiller, 2007; Belitz *et al.*, 2009). Hal tersebut didukung oleh hasil pengamatan citra SEM yang menunjukkan mikrostruktur sampel termodifikasi terlihat lebih *porous* (Gambar 1). Tanpa kombinasi proses ultrasonikasi dan gelombang mikro, perlakuan PPL yang diberikan oleh Zavareze *et al.* (2010) tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap puncak kekentalan pati beras.

Perbedaan antara nilai viskositas puncak dan *holding viscosity* (viskositas setelah suhu dijaga konstan pada 95°C) disebut nilai *breakdown* (Mitchell, 2009). Semakin kecil nilai *breakdown* maka viskositas pasta semakin stabil selama pemanasan. Tepung termodifikasi memiliki nilai *breakdown* lebih kecil dibandingkan tepung asli ( $P < 0,05$ ). Bahkan tepung dengan perlakuan gelombang mikro kadar air 50%-HMT 8 dan 10 jam tidak mengalami penurunan viskositas saat dipanaskan pada suhu konstan 95°C, sehingga nilai *breakdown*nya tidak dapat ditentukan (Tabel 4). Menurut Zavareze *et al.* (2010) nilai *breakdown* pati beras dengan perlakuan HMT lebih rendah dibandingkan pati asli, dengan persentase penurunan berkisar antara 28–75%. Persentase tersebut lebih kecil dibandingkan persentase penurunan nilai *breakdown* pada penelitian ini yakni tidak terdeteksi–92%. Semakin besarnya persentase penurunan *breakdown* pada penelitian ini dapat disebabkan oleh kombinasi dengan perlakuan ultrasonikasi dan pemanasan gelombang mikro serta perbedaan parameter proses HMT yang digunakan. Kombinasi perlakuan menyebabkan peningkatan kekompakan

struktur pati pada tepung beras sehingga penyerapan air oleh granula pati menjadi terbatas. Rendahnya penyerapan air membatasi pembengkakan granula. Granula pati dengan pembengkakan granula yang terbatas, viskositas serta tingkat disintegrasi strukturnya lebih tidak terpengaruh oleh pengadukan dan pemanasan, sehingga nilai *breakdown*nya kecil (Adebawale *et al.*, 2005). Nilai *setback* menggambarkan kecenderungan pati untuk mengalami retrogradasi yakni proses reasosiasi molekul pati membentuk struktur kristalin selama didinginkan pada suhu 50°C (BeMiller, 2007). Nilai *setback* merupakan selisih antara nilai viskositas pada suhu 50°C dengan *holding viscosity* (Tabel 4). Seluruh tepung termodifikasi memiliki nilai *setback* lebih kecil dibandingkan tepung asli ( $P < 0,05$ ).

Nilai *setback* pati beras dengan perlakuan HMT, lebih rendah dibandingkan pati asli, dengan persentase penurunan berkisar antara 12–52% (Zavareze *et al.*, 2010). Persentase tersebut lebih kecil dibandingkan persentase penurunan nilai *setback* pada penelitian ini yakni 44–67%. Semakin besarnya persentase penurunan *setback* pada penelitian ini dapat disebabkan oleh kombinasi dengan perlakuan ultrasonikasi dan pemanasan gelombang mikro. Baik tepung dengan perlakuan gelombang mikro-HMT dan ultrasonikasi-HMT menunjukkan penurunan nilai *setback*. Penurunan nilai *setback* tersebut karena molekul pati telah membentuk konformasi yang lebih kompak. Hal tersebut sesuai dengan data kadar RS yang lebih tinggi. Struktur yang lebih kompak membuat kecenderungan retrogradasi menurun, karena berkurangnya jumlah amilosa terlarut yang diperlukan dalam proses retrogradasi.

Beberapa produk pangan memerlukan jenis tepung/pati yang memiliki puncak viskositas, nilai *breakdown* dan nilai *setback* yang lebih rendah. Sup instan berbentuk bubuk yang harus direhidrasi sebelum dikonsumsi, memerlukan karakteristik pati yang memiliki nilai *breakdown* rendah namun viskositasnya cukup tinggi sebagai pengisi seperti tepung beras dengan perlakuan ultrasonikasi-HMT dan gelombang mikro kadar air 20%-HMT 10 jam. Sehingga saat dikonsumsi hangat sup tidak kehilangan kekentalannya. Namun karena puncak viskositas tepung tersebut tidak cukup tinggi, maka diperlukan tambahan pati lain yang mempunyai viskositas yang tinggi sehingga dalam penggunaannya tidak berlebihan. Tepung/pati yang memiliki nilai *setback* rendah sesuai untuk produk yang disimpan dingin seperti makanan beku. Jenis tepung yang sesuai pada penelitian ini adalah tepung dengan perlakuan gelombang mikro kadar air 50%-HMT.



Gambar 3. Profil sifat pasta tepung beras asli (a) tepung dengan perlakuan kombinasi gelombang mikro-HMT pada kadar air 50% HMT 8 jam (b) 10 jam (f), kadar air 20% HMT 10 jam (c) serta ultrasonikasi pada kadar air 20% HMT 10 (d) 12 jam (e); suhu proses RVA (g)

Tabel 4. Sifat pasta tepung *native* dan sampel termodifikasi\*

Sampel	Pasting Temp. (°C)	Puncak Viskositas (cP)	Holding Viscosity (cP)	Cold Viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Setback (cP)
Native	82,64±0,04 <sup>b</sup>	3791,50±3,54 <sup>a</sup>	2178,00±5,66 <sup>a</sup>	4351,50±48,79 <sup>a</sup>	1613,50±9,19 <sup>a</sup>	2173,50±54,45 <sup>a</sup>
M20H10	90,21±0,06 <sup>a</sup>	1977,00±69,30 <sup>b</sup>	1832,50±0,71 <sup>ab</sup>	3020,00±209,30 <sup>b</sup>	144,50±68,60 <sup>b</sup>	1187,50±208,60 <sup>b</sup>
M50H8	82,73±1,73 <sup>b</sup>	1209,50±171,83 <sup>c</sup>	1199,00±173,95 <sup>c</sup>	2047,50±204,35 <sup>c</sup>	-	848,50±30,41 <sup>bc</sup>
M50H10	84,04±0,72 <sup>b</sup>	1094,00±196,58 <sup>c</sup>	1051,00±164,05 <sup>c</sup>	1776,50±246,78 <sup>c</sup>	-	725,50±82,73 <sup>c</sup>
U20H10	89,62±0,22 <sup>a</sup>	1914,00±65,05 <sup>b</sup>	1777,00±1,41 <sup>b</sup>	2844,50±231,22 <sup>b</sup>	137,00±63,64 <sup>b</sup>	1067,50±229,81 <sup>bc</sup>
U20H12	89,74±0,53 <sup>a</sup>	2003,50±338,70 <sup>b</sup>	1811,00±274,36 <sup>ab</sup>	3020,00±558,61 <sup>b</sup>	192,50±64,35 <sup>b</sup>	1209,00±284,26 <sup>b</sup>

Keterangan: \*data dengan superscript berlainan dalam satu kolom maka berbeda secara signifikan ( $P < 0,05$ )

Tepung/pati seperti tepung beras dengan perlakuan ultrasonikasi-HMT dan gelombang mikro kadar air 20%-HMT 10 jam yang memiliki puncak viskositas rendah serta nilai setback yang cukup tinggi sesuai untuk produk *breakfast cereal* yang menghendaki kerenyahan dan tidak menghendaki penyerapan air berlebih saat dikonsumsi. Oleh karena itu pengembangan tepung beras patah dan menir termodifikasi dapat memberikan alternatif bahan baku fungsional yang sesuai bagi produk pangan tertentu.

### KESIMPULAN

Kombinasi perlakuan ultrasonikasi dan gelombang mikro dengan HMT efektif menghasilkan tepung beras dengan kadar RS lebih tinggi. Namun peningkatan pada kombinasi perlakuan ultrasonikasi-HMT dan gelombang mikro-HMT masih lebih rendah dibandingkan peningkatan kadar RS pada perlakuan HMT selama 12 jam. Perlakuan kombinasi yang diberikan meningkatkan suhu awal gelatinisasi, menurunkan kekentalan pasta, nilai breakdown dan nilai setback. Perlakuan kombinasi

ultrasonikasi dan gelombang mikro dengan HMT menyebabkan pembesaran agregat granula, membuat permukaan agregat lebih *porous* serta menurunkan rasio kristalinitas.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *South East Asian Regional Center for Graduate Study and Research in Agriculture* (SEARCA) yang telah mendanai penelitian ini, serta kepada Institut Pertanian Bogor (IPB) dan Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi) atas segala dukungan yang diberikan selama berlangsungnya penelitian.

### DAFTAR PUSTAKA

[AOAC] Association of Official Analytical Chemistry. 2005. Official method of analysis. 18th Edition. Chapter 32, 46-70. Cereal Foods. Association of Official Analytical Chemistry International, Washington D.C.



- Adebowale KO, Afolabi TA, Olu-Owolabi BI. 2005. Hydrothermal treatments of finger millet (*Eleusine coracana*) starch. *Food Hydrocolloid* 19: 974–983. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2004.12.007.
- Ahza AB, Faridah DN, Kusbiantoro B, Ardhiyanti SD. 2016. Physical Process Performance and Methods To Enhance Resistant Starch of Broken Rice Flour. Presented at International Conference Food Innovations: ASEAN Economic Community (AEC) Challenges 2016. Jakarta International Expo, September 21st-23rd 2016.
- Ambigaipalan P, Hoover R, Donner E, Liu Q. 2014. Starch chain interactions within the amorphous and crystalline domains of pulse starches during heat-moisture treatment at different temperatures and their impact on physicochemical properties. *Food Chem* 143: 175–184. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.07.112.
- Anderson AK, Guraya HS. 2006. Effects of gelombang mikro heat-moisture treatment on properties of waxy and non-waxy rice starches. *Food Chem* 97: 318–323. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.04.025.
- Belitz HD, Grosch W, Schieberle P. 2009. *Food Chemistry 4th Revised and Extended Edition*. 315-327. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- BeMiller JN. 2007. *Carbohydrate Chemistry for Food Scientists Second Edition*. Minnesota (USA): AACC International Press.
- Birt DF, Boylston T, Hendrich S, Jane JL, Hollis J, Li L, McClelland J, Moore S, Phillips GJ, Rowling M, Schalinske K, Scott MP, Whitley EM. 2015. Resistant starch: promise for improving human health. *Adv Nutr* 4: 587–601. DOI: 10.3945/an.113.004325.
- Bizkup RC, Rokita B, Lotfy S, Ulanski P, Rosiak JM. 2005. Degradation of chitosan and starch by 360-kHz ultrasound. *Carbohydr Polym* 60: 175–184. DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.12.001.
- Brouns F, Kettlitz B, Arrigoni E. 2002. Resistant starch and the butyrate revolution. *Trends Food Sci Technol* 13: 251-261. DOI: 10.1016/S0924-2244(02)00131-0.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2015. SNI Beras (SNI 6128:2015). Jakarta.
- Cham S, Suwannaporn P. 2010. Effect of hydrothermal treatment of rice flour on various rice noodles quality. *J Cereal Sci* 51: 284–291. DOI: 10.1016/j.jcs.2010.01.002.
- Chung HJ, Liu Q, Hoover R. 2009. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. *Carbohydr Polym* 75: 436–447. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.08.006.
- de Souza D, Sbardelotto AF, Ziegler DR, Marczak LDF, Tessaro IC. 2016. Characterization of rice starch and protein obtained by a fast alkaline extraction method. *Food Chem* 191: 36–44. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.03.032.
- Hoover R. 2010. The impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches isolated from different botanical sources. *Crit Rev Food Sci* 50: 835–847. DOI: 10.1080/10408390903001735.
- Htoon A, Shrestha AK, Flanagan BM, Lopez-Rubio A, Bird AR, Gilbert EP, Gidley MJ. 2009. Effects of processing high amylose maize starches under controlled conditions on structural organisation and amylase digestibility. *Carbohydr Polym* 75: 236–245. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.06.016.
- Hung PV, Chau HT, Phi NTL. 2016. In vitro digestibility and in vivo glucose response of native and physically modified rice starches varying amylose contents. *Food Chem* 191: 74–80. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2015.02.118.
- Jambrak A, Herceg Z, Šubarić D, Babić J, Brncić M, Brncić SR, Bosiljkov T, Čvek D, Tripalo B, Gelo J. 2010. Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydr Polym* 79: 91–100. DOI: 10.1016/j.carbpol.2009.07.051.
- Jiang Q, Xu X, Jin Z, Tian Y, Hu X, Bai Y. 2011. Physicochemical properties of rice starch gels: Effect of different heat treatments. *J Food Eng* 107: 353–357. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2011.07.006.
- Jiranuntakul W, Puttanlek C, Rungsardthong V, Panchanon S, Uttapap D. 2011. Microstructural and physicochemical properties of heat-moisture treated waxy and normal starches. *J Food Eng* 104: 246–258. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.12.016.
- Kaur B, Ariffin F, Bhat R, Karim AA. 2012. Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloid* 26: 398-404. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2011.02.016.
- Kiatponglerpa W, Tongta S, Rolland-Sabatéb A, Buléonba A. 2015. Crystallization and chain reorganization of debranched rice starches in relation to resistant starch formation. *Carbohydr Polym* 122: 108–114. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.12.070.
- Klein B, Pinto VZ, Vanier NL, Zavareze ER, Colussi R, Evangelho JA, Gutkoski LC, Dias ARG. 2013. Effect of single and dual heat-moisture treatments on properties of rice, cassava, and

- pinhao starches. *Carbohydr Polym* 98: 1578–1584. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.07.036.
- Leewatchararongjaroen J, Anuntagool J. 2016. Effects of dry-milling and wet-milling on chemical, physical and gelatinization properties of rice flour. *Rice Sci* 23: 274–281. DOI: 10.1016/j.rsci.2016.08.005.
- Pinto VZ, Vanier NL, Deon VG, Moomand K, El Halal SLM, Zavareze ER, Lim LT, Dias ARG. 2015. Effects of single and dual physical modifications on pinhao starch. *Food Chem* 187: 98–105. DOI: 10.1016/J.FOODCHEM.2015.04.037.
- Pratiwi M. 2016. Structural Changes of Arrowroot Starch (*Marantha arundinacea* L.) as the Impact of Multiple Treatments by Acid Hydrolysis, Debranching, Autoclaving-cooling Cycles, and Heat Moisture Treatment (HMT). [Thesis]. Sekolah Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor.
- Pukkahuta C, Shobsngob S, Varavinit S. 2007. Effect of osmotic pressure on starch: new method of physical modification of starch. *Starch/Stärke* 58:78-90. DOI: 10.1002/star.200600509.
- Schmiedl D, Bauerlein M, Bengs H, Jacobasch G. 2000. Production of heatstable, butyrogenic resistant starch. *Carbohydr Polym* 43: 183-193. DOI: 10.1016/S0144-8617(00)00147-8.
- Sujka M, Jamroz J. 2013. Ultrasound-treated starch: SEM and TEM imaging, and functional behaviour. *Food Hydrocolloid* 31: 413-419. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2012.11.027.
- Warren FJ, Gidley MJ, Flanagan BM. 2016. Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure—a joint FTIR–ATR, NMR, XRD and DSC study. *Carbohydr Polym* 139: 35–42. DOI: 10.1016/j.carbpol.2015.11.066.
- Zavareze ER, Storck CR, Castro LAS, Schirmer MA, Dias ARG. 2010. Effect of heat-moisture treatment on rice starch of varying amylose content. *Food Chem* 121: 358–365. DOI: 10.1016/j.foodchem.2009.12.036.
- Zeng F, Ma F, Kong F, Gao Q, Yu S. 2015a. Physicochemical properties and digestibility of hydrothermally treated waxy rice starch. *Food Chem* 172: 92–98. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.09.020.
- Zeng S, Wua X, Lin S, Zeng H, Lua X, Zhang Y, Zheng B. 2015b. Structural characteristics and physicochemical properties of lotus seed resistant starch prepared by different methods. *Food Chem* 186: 213–222. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.03.143.
- Zhou Y, Meng S, Chen D, Zhu X, Yuan H. 2014. Structure characterization and hypoglycemic effects of dual modified resistant starch from indica rice starch. *Carbohydr Polym* 103: 81–86. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.12.020.